

На правах рукописи



Калимуллин Рустем Ирекович

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН И ЛАЗЕРНЫХ
ПУЧКОВ С ИНДУЦИРОВАННЫМИ РЕШЕТКАМИ И
ДОМЕННЫМИ СТРУКТУРАМИ В
СЕГНЕТОПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КРИСТАЛЛАХ
НИОБАТА ЛИТИЯ**

01.04.10 - Физика полупроводников

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук**

Казань - 2009

Работа выполнена в
Государственном образовательном учреждении высшего профессионального
образования «Казанский государственный энергетический университет»

Научный консультант доктор физико-математических наук, профессор
Голенищев-Кутузов Александр Вадимович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Вендик Орест Генрихович

доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник
Несмелова Ирина Михайловна

доктор физико-математических наук, профессор
Самарцев Виталий Владимирович

Ведущая организация: Институт радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН, г. Москва

Защита состоится 20 ноября 2009 года в 14 часов 30 минут на заседании
диссертационного совета Д212.082.01 при ГОУ ВПО «Казанский
государственный энергетический университет»,
по адресу: 420066, Казань, Красносельская, 51, тел./факс (843) 562-43-30.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью
учреждения, просим направлять по адресу: 420066, г. Казань, ул.
Красносельская, 51, КГЭУ, ученому секретарю диссертационного совета
Д 212.082.01.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Казанского
государственного энергетического университета

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА КГУ



0000642576

Автореферат разослан " 1 " октября 2009 г.

И.о. ученого секретаря
диссертационного совета

В.Корнилов Корнилов В.Ю.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Создание во второй половине XX века двух новых направлений в электронике – опто- и акустоэлектроники – стало началом интенсивного применения новых материалов и, в первую очередь, нецентросимметричных оксидных сегнетоэлектриков, обладающих не только рекордными значениями нелинейных оптических коэффициентов, но и сильным пьезоэффектом [1–3]. На протяжении сорока лет лидерами в практическом применении для устройств нелинейной оптики и оптоэлектроники (модуляторы, дефлекторы, фильтры, умножители частоты) и одновременно акустоэлектроники (пьезопреобразователи, фильтры, линии задержки и другие устройства на поверхностных акустических волнах) стали кристаллы ниобата лития. Они относятся к классу высокоомных сегнетополупроводников с примесным типом проводимости [4] (ширина запрещенной зоны при стехиометрическом составе $E_g = 3.9$ эВ). Если недопированные кристаллы обладают удельной проводимостью σ порядка 10^{-15} Ом $^{-1}$ ·см $^{-1}$, то даже при слабом легировании ионами железа ($Fe \sim 10^{25} - 10^{26}$ м $^{-3}$) значение σ возрастает до $10^{-7} - 10^{-8}$ Ом $^{-1}$ ·см $^{-1}$. Значительное изменение электрических и оптических характеристик происходит при оптическом облучении допированных кристаллов (фотопроводимость, фотовольтаический и фоторефрактивный эффекты). Необычное сочетание превосходных линейных и нелинейных оптических и упругих характеристик кристаллов ниобата лития, их значительные изменения при допировании ионами группы железа, воздействии термического отжига и оптического облучения с одной стороны находят широкое применение, а с другой стороны являются преградой для более широкого их использования.

До середины 1990-х годов наибольшее внимание исследователей было обращено на увеличение стойкости электрооптических параметров к лазерному воздействию и разработку на этой основе нового поколения оптоэлектронных и акустоэлектронных устройств. В то же время были недостаточно исследованы взаимодействия лазерных пучков с примесными центрами и роль ян-теллеровских ионов в процессах образования фотондуцированных доменов и доменных структур. Малое внимание было обращено и на взаимодействие акустических волн с фотондуцированными структурами в сегнетопьезоэлектриках и, в частности, ниобате лития. В первую очередь это относится к отсутствию общей концепции представления ниобата лития и подобных ему материалов, содержащих периодические структуры, в качестве модельных образцов фононных кристаллов, хотя

первые теоретические исследования были выполнены еще в 50-е гг. XX века [5]. Несомненно, что подобные экспериментальные и теоретические исследования расширили бы горизонты развития нелинейной акустоэлектроники.

Отмеченные выше обстоятельства определили постановку цели и задачи диссертационной работы.

Цель диссертационной работы – разработка концепции и физических принципов взаимодействия акустических волн и лазерных пучков с периодическими структурами в виде решеток и доменов в сегнетопьезоэлектрических кристаллах и создание на этой основе нового поколения акустоэлектронных приборов и устройств.

В соответствии с указанной целью были сформулированы следующие задачи диссертационной работы.

1. Изучение динамики оптического возбуждения фотоактивных ионов и образования фотоиндуцированных электрических полей.

2. Установление механизмов влияния примесных ионов с переменной валентностью на формирование индуцированных решеток и периодических доменных структур.

3. Изучение особенностей распространения акустических волн через индуцированные решетки и периодические доменные структуры и установление частотных интервалов разрешенных и запрещенных фоновых зон в ниобате лития.

4. Исследование механизмов генерации акустических волн путем лазерного воздействия на периодические структуры.

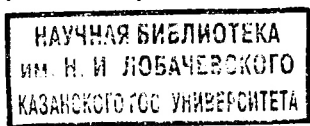
5. Установление процессов и механизмов нелинейного взаимодействия акустических волн с периодическими структурами.

6. Разработка и создание методов и технических средств преобразования и управления параметрами акустических волн, распространяющихся через периодические структуры (генерация гармоник, обращение волнового фронта и т.д.).

Научная новизна работы состоит в том, что впервые были получены следующие результаты.

1. Обнаружена и исследована пространственно-периодическая структура электрического поля в ниобате лития, возникающая под действием пьезоэлектрического поля стоячей ультразвуковой волны.

2. Разработаны и реализованы оптоакустический и лазерный способы формирования индуцированных решеток и периодических доменных



структур в ниобате лития, допированном ионами с переменной валентностью.

3. В результате комплексного изучения пространственного распределения концентрации примесных ионов с переменной валентностью, напряженностей фотоиндуцированных электрических полей, показателей преломления, скоростей и поглощения ультразвуковых волн на границах и по сечению областей лазерного воздействия на кристаллы ниобата лития разработана микроскопическая модель формирования фотоиндуцированных решеток и доменных структур в сегнетоэлектрических пьезополупроводниковых кристаллах, допированных ионами железа.

4. В частотных спектрах распространения акустических волн через индуцированные решетки и периодические доменные структуры, сформированные в ниобате лития, обнаружены и изучены полосы полного отражения и полосы полного пропускания волн в широком частотном диапазоне, что позволило отнести подобные кристаллы к классу фононных кристаллов.

5. Обнаружена и исследована генерация акустических волн при облучении лазерными импульсами периодической доменной структуры в ниобате лития.

6. Обнаружена и исследована генерация второй акустической гармоники на периодической доменной структуре в ниобате лития при параметрическом взаимодействии двух акустических волн, распространяющихся в противоположных направлениях, а также генерация второй гармоники при нелинейном взаимодействии акустической волны с периодической доменной структурой.

7. Обнаружено и исследовано обращение волнового фронта акустической волны на периодической доменной структуре при одновременном воздействии на доменную структуру лазерных импульсов.

Научно-практическая значимость работы заключается в следующем.

1. Показана возможность использования разработанных новых оптоакустического и лазерного способов формирования периодических структур в сегнетоэлектриках в качестве новых фотонных и фононных кристаллов с периодическими структурами в наноразмерном масштабе.

2. Исследованные частотные интервалы запрещенных и разрешенных зон для акустических волн могут найти применение в устройствах обработки акустических сигналов.

3. Исследованные нелинейные свойства кристаллов ниобата лития со сформированными периодическими структурами могут быть основой для расширения частотного спектра генерируемых акустических волн в частотном диапазоне $10^9 - 10^{10}$ Гц, а также для управления параметрами акустических информационных сигналов.

4. Разработанный и реализованный способ перестройки частоты акустических резонаторов на основе перезаписи фотоиндуцированных решеток может найти применение в фильтрах на объемных и поверхностных акустических волнах.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Интенсивное лазерное облучение поверхности сегнетоэлектрических кристаллов, содержащих ионы с переменной валентностью, приводит к возникновению областей с инвертированной поляризацией (инвертированных доменов), что связано с пространственным разделением ионов Fe^{2+} и Fe^{3+} , причем основной вклад в образование инверсных доменов вносят ионы Fe^{2+} (ян-теллеровские ионы), вокруг которых возникают градиенты полей, обратных по знаку полю спонтанной поляризации.

2. Пьезоэлектрическое поле стоячей акустической волны создает перераспределение концентраций фотоиндуцированных электронов между примесными ионами в сегнетоэлектрике-пьезополупроводнике, и при достаточной интенсивности поля возникает образование структуры инвертированных доменов с периодом, равным периоду стоячей акустической волны.

3. Кристаллы ниобата лития со сформированными доменными структурами или индуцированными решетками обладают полосовым акустическим спектром, состоящим из зон полного пропускания и полного отражения, и могут служить в качестве фоновых кристаллов.

4. Генерация второй гармоники акустической волны возникает за счет нелинейного взаимодействия с периодической доменной структурой в пьезоэлектрическом кристалле.

5. Разработанный механизм обращения волнового фронта акустических волн на периодической доменной структуре основан на взаимодействии оптически индуцированного поля зарядов примесных ионов Fe^{2+} и Fe^{3+} с внутридоменными полями поляризации.

6. Предложенный механизм лазерной генерации акустических колебаний основан на модуляции внутридоменных полей индуцированным полем ионных зарядов.

Достоверность полученных результатов и обоснованность научных положений и выводов подтверждаются их непротиворечивостью особенностям известных и предложенных нами моделей, а также публикациями других авторов, как параллельными, так и более поздними, результаты которых хорошо согласуются с нашими.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих международных и всероссийских конференциях и симпозиумах: VI международный симпозиум по фотонному эхо и когерентной спектроскопии (Йошкар-Ола, 1997), Международный симпозиум по акустоэлектронике, управлению частотой и генерации сигналов (С.-Петербург, 1998), XV Всероссийская конференция по физике сегнетоэлектриков (Ростов-на-Дону, 1999), Международный форум по волновой электронике и ее применениям в информационных и телекоммуникационных системах (С.-Петербург, 2000), IX Международная конференция «Физика диэлектриков» (С.-Петербург, 2000), VII международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь» (Воронеж, 2001), VII международный симпозиум по сегнетоэлектричеству (С.-Петербург, 2002), Международная научная конференция «Актуальные проблемы физики твердого тела. ФТТ-2003» (Минск, 2003), X Международная конференция «Физика диэлектриков» (С.-Петербург, 2004), IX Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы твердотельной электроники и микроэлектроники» (Таганрог, 2004), Международная научная конференция «Актуальные проблемы физики твердого тела. ФТТ-2005» (Минск, 2005), X Всероссийская конференция по проблемам науки и высшей школы «Фундаментальные исследования в технических университетах» (С.-Петербург, 2006), II Международный симпозиум «Микро- и наноразмерные доменные структуры в сегнетоэлектриках» (Екатеринбург, 2007), I Международный междисциплинарный симпозиум «Среды со структурным и магнитным упорядочением. Multiferroics-2007» (Ростов-на-Дону, 2007), XV международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь» (Воронеж, 2009).

Полученные результаты были включены в отчеты по грантам РФФИ (96-02-18229-а, 99-02-17593-а, 01-02-16358-а, 04-02-97500-р_офи, 05-02-17142-а, 08-02-00434-а) и по гранту Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук (МК-7352.2006.2).

Публикации. Основное содержание диссертации изложено в 20 печатных работах, в том числе 12 – в изданиях, рекомендованных ВАК, 1 патенте на изобретение, 1 монографии, 6 – в материалах международных и всероссийских конференций.

Личный вклад автора в проведенное исследование. Постановка проблемы, разработка экспериментальной методики, выполнение экспериментов и интерпретация результатов проведены совместно с соавторами. Основная часть экспериментальных результатов получена автором лично. Соавторы не возражают против использования результатов исследования в материалах диссертации.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения и библиографического списка, включающего 208 наименований. Основное содержание работы изложено на 245 страницах, содержит 57 рисунков, 3 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении дается краткая общая характеристика проблем изучения взаимодействия акустических волн и оптических пучков с периодическими структурами – доменами и решетками, сформированными в сегнетоэлектриках, допированных ионами с переменной валентностью. Обосновывается выбор и актуальность темы диссертации, формулируется цель работы, обосновывается выбор объектов и методов исследования. Приводится общее описание работы, положения, выносимые на защиту, сведения об апробации, личный вклад автора.

В первой главе, являющейся обзорной, дано введение в проблему исследования особенностей физических свойств сегнето-пьезополупроводниковых материалов, содержащих микро- и наноразмерные периодические структуры в виде решеток и доменов. Выполнено аналитическое сравнение особенностей электронных, фотонных и фононных кристаллов с определенным уклоном в сторону последних. Рассмотрены общие особенности спектральных характеристик фононных кристаллов, включая полосы пропускания и «фононные щели».

Большое внимание уделено использованию оксидных сегнетоэлектриков типа ниобата лития в качестве фотонных и фононных кристаллов, способных осуществлять частотное преобразование, дифракцию и генерацию оптических и акустических волн.

Далее в первой главе рассмотрены известные способы формирования пространственно периодических структур в виде решеток и доменов, отмечены их достоинства и недостатки. Рассмотрены особенности фотоиндуцированных эффектов в оксидных сегнетоэлектриках-полупроводниках и, в первую очередь, фотоиндуцированное изменение показателя преломления (фоторефрактивный эффект) [6] и изменение упругих параметров [7]. Особое внимание уделено роли примесных ионов с переменной валентностью в фотоиндуцированных эффектах. Отмечено, что до сих пор нет полной и непротиворечивой модели, описывающей процесс формирования и закрепления решеток под действием лазерного излучения и влияния на него таких ян-теллеровских ионов как Fe^{2+} , Mn^{3+} , Cr^{2+} , Cr^{4+} , которыми чаще всего допируют оксидные сегнетоэлектрики для увеличения фоторефрактивного эффекта.

Далее приведена краткая информация о ряде физических свойств оксидных сегнетоэлектриков, которые наиболее часто используются для создания в них периодических доменных структур (ПДС): ниобата и танталата лития, титаната бария. Описаны основные физические свойства материалов с доменными структурами. Обсуждены достоинства и недостатки наиболее распространенных способов формирования доменных структур в оксидных сегнетоэлектриках – ростового во внутреннем электрическом поле и послеростового во внешнем поле. Обсуждены механизмы формирования доменов от острых наноразмерных игл до микроскопических доменов.

Вторая и последующая главы являются оригинальными и содержат результаты экспериментальных исследований и их теоретическое обоснование.

Во второй главе представлены результаты изучения возможностей разработки новых методов формирования доменных структур в оксидных сегнетоэлектриках. Первая часть главы посвящена вопросам формирования доменных структур в поле стоячей акустической волны. По сути дела, в этом способе используется принцип фотогенерации большого количества свободных электронов от примесных ионов типа Fe^{2+} , являющихся в этом процессе донорами. В результате фотогальванического эффекта поток свободных электронов перемещается в поле спонтанной поляризации. Интенсивность ранее (в отсутствие акустической волны) однородного потока модулируется пространственно неоднородным и знакопеременным пьезоэлектрическим полем, сопровождающим стоячую акустическую волну.

Возникновение отрицательной компоненты пьезоэлектрического поля с ростом концентрации свободных электронов и увеличением амплитуды

акустической волны приводит к частичной, а затем и полной компенсации поля спонтанной поляризации, т.е. к возникновению локальной переполаризации в областях пучностей стоячей акустической волны – возникновению структуры доменов типа «голова к голове». Экспериментально возникновение доменной структуры в ниобате лития с железом наблюдалось по пространственно периодическому изменению оптического показателя преломления компенсационным методом, а также интерференционным методом. При облучении образцов широким однородным лазерным пучком ($\lambda = 0,53$ мкм) и одновременном возбуждении стоячей поверхностной акустической волны (ПАВ) с амплитудой относительной деформации $u \geq 5 \cdot 10^{-5}$ было обнаружено возникновение вдоль оси z пространственно периодических изменений показателя преломления Δn (рис. 1). При $T < 140^\circ\text{C}$ они имели вид униполярной структуры с периодом $d \approx 55$ мкм, соответствующим половине длины волны ПАВ при скорости распространения $V_R = 3490$ м/с (рис. 1, б). Величина изменения Δn была пропорциональна значению относительной акустической деформации и интенсивности оптического пучка.

В температурном интервале $140\text{--}160^\circ\text{C}$ и при повышении амплитуды относительной деформации до 10^{-4} периодическая структура изменений Δn скачкообразно становилась симметричной (биполярной по знаку) (рис. 1, а).

На микроскопическом уровне процесс образования доменной структуры можно объяснить с помощью следующей модели. Электрическое поле, сопровождающее акустическую волну в пьезоэлектрическом кристалле (пьезоэлектрическое поле), можно считать квазистатической волной. Поскольку в диапазоне частот $10^7\text{--}10^8$ Гц длина свободного пробега электронов во много раз меньше длины акустической волны, то

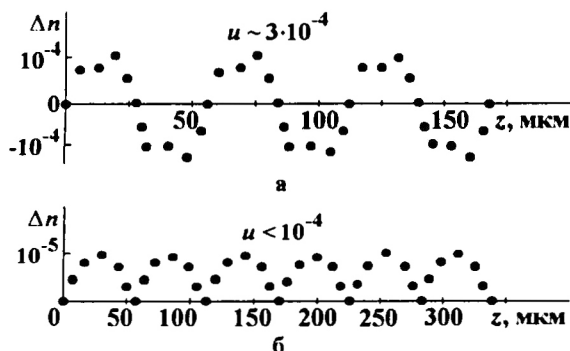


Рис. 1. Изменения показателя преломления вдоль оси z образца ниобата лития при $T = 150^\circ\text{C}$: а – биполярная зависимость; б – униполярная

пьезоэлектрическое поле можно рассматривать в классическом пределе как источник возмущения начальной равномерной плотности свободных электронов (n_0).

При взаимодействии двух встречных акустических волн 1 и 2, что соответствует условиям нашего эксперимента, возникает ток:

$$j_a = q\mu(n_{a1}E_{a1} + n_{a2}E_{a2}), \quad (1)$$

где q – заряд электрона; μ – подвижность электронов; n_a – концентрация электронов, зависящая от интенсивности акустических колебаний и определяемая величиной нелинейного акустоэлектронного взаимодействия; E_a – напряженность пьезоэлектрического поля.

При равенстве частот и напряженностей пьезоэлектрических полей встречных волн ток j_a создает пространственно модулированный электрический потенциал с нулевой частотой и волновым вектором $k_a = 2\omega/V_a$, где V_a – скорость акустической волны.

Таким образом, равномерно фотогенерируемые электроны будут находиться в пространственно модулированном электрическом поле

$$E_d = \frac{qgt\mu e\tau u}{(\epsilon\epsilon_0)^2}, \quad (2)$$

где g – скорость генерации носителей; t – время облучения.

Следовательно, фотоиндуцированное поле пространственного заряда будет пропорционально величине относительной деформации, создаваемой акустической волной.

При $\mu \approx 10^2 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, $\tau \approx 10^{-13} \text{ с}$, $e_{33} = 1,3 \text{ Кл/м}^2$, концентрации свободных электронов $g \cdot t \sim 10^{21} \text{ м}^{-3}$ и деформациях $u \sim 10^{-4}$ поле пространственного заряда будет достигать значений 10^6 В/м , что вполне достаточно для периодической пространственной модуляции знака спонтанной поляризации при 150°C .

Во второй части главы представлен новый лазерный способ формирования доменных структур в сегнетоэлектриках, основанный на локальной переполаризации образца в области оптического облучения. Макродомены были получены нами в монокристалле $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ под действием только лазерного воздействия с $\lambda = 0,53 \text{ мкм}$ при 150°C . Необходимость повышения температуры была связана с понижением коэрцитивного поля E_c от $2 \cdot 10^7 \text{ В/м}$ при $T \approx 20^\circ\text{C}$ до 10^6 В/м при 150°C .

Использовались монокристаллические образцы, содержащие ионы железа с общей концентрацией $\sim 10^{25} \text{ м}^{-3}$ и отожженные в гелии до

повышения относительной концентрации ионов Fe^{2+} до 25-35%. Оптическое облучение в виде узких полосок (20–200 мкм) создавалось с помощью цилиндрической линзы серией коротких (примерно 60 нс) импульсов с плотностью мощности 10^8 – 10^9 Вт/м² второй гармоники лазера на ИАГ (ЛТИ-709). Возникновение доменов с инвертированной поляризацией наблюдалось с помощью интерферометрического способа, основанного на различии знака электрооптического тензора для соседних 180°-ных доменов. С помощью этого метода путем сканирования сфокусированным пучком ($\varnothing 20$ мкм) маломощного He-Ne лазера поверхности уз вдоль оси z и при приложении вдоль оси z электрического поля было установлено изменение знака поляризации в области оптического облучения поверхности xz (рис. 2). Ширина доменов составляла 20–150 мкм в прямой зависимости от ширины полосы оптического облучения. При уменьшении температуры образца ниже 130°C инвертированная поляризация не возникала, а создавалось только фотоиндуцированное изменение показателя преломления Δn .

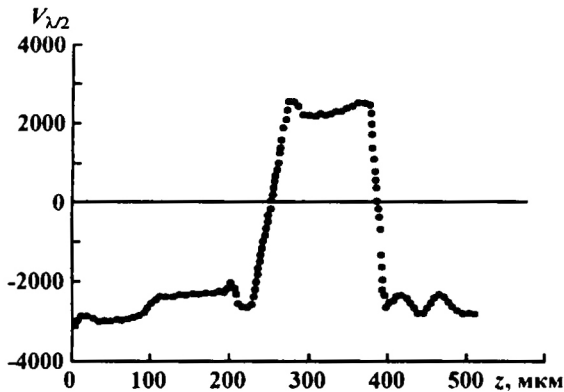


Рис. 2. Зависимость полуваляного напряжения от положения сканирующего оптического пучка

Полученные результаты позволили нам провести исследование фотоиндуцированных процессов при облучении xz -поверхности образца ниобата лития с железом двумя интерферирующими лазерными пучками в приложенном электрическом поле и при температуре 160°C. После охлаждения образца и облучения пространственно однородным оптическим пучком путем сканирования вдоль оси z узким пучком He-Ne лазера было обнаружено возникновение структуры чередующихся полосовых доменов типа «голова к голове» с периодом порядка 20–30 мкм. Другое доказательство того, что данная периодическая структура образована

доменами, а не является обычной фоторефрактивной решеткой, состоит в обнаружении нами генерации второй гармоники поверхностной акустической волны, что возможно только на доменной структуре. Уместно отметить, что коэффициент преобразования во вторую гармонику практически совпадал с результатами, которые были получены при генерации второй гармоники на доменной структуре, сформированной обычным электрическим способом.

Позднее предложенный нами лазерный способ формирования доменных структур получил подтверждение [8, 9].

Третья глава содержит результаты изучения особенностей физических свойств слоев решеток и доменов в ниобате лития. Особое внимание при этом было обращено на границы и приграничные области слоев и доменов. Наши исследования начались еще в конце XX века и продолжились до момента написания диссертационной работы. Сложность исследований заключалась в том, что в решетках соседние слои отличаются значениями диэлектрических постоянных, показателей преломления и модулей упругости вследствие значительных градиентов фотоиндуцированных полей, а в доменных структурах диэлектрические проницаемости и модули упругости одинаковы во всех доменах и различаются только знаками на границах.

Для наших исследований были использованы оптические и акустические методы. Путем сканирования узкими лазерными и ультразвуковыми пучками с разрешающей способностью соответственно 10 и 200 мкм было исследовано пространственное распределение концентраций ионов Fe^{2+} и Fe^{3+} , фотоиндуцированных градиентов ионных зарядов, коэффициентов оптического поглощения и преломления, напряженностей фотоиндуцированных полей, скорости и затухания поверхностных и объемных акустических волн.

Распределение указанных выше параметров для решетки изучалось после облучения поверхности ниобата лития лазерным пучком в виде полосы шириной 1 мм. В результате процесса облучения, подобного тому, что выполняется при формировании решеток, были обнаружены следующие особенности. Вблизи области облучения со стороны отрицательного полюса спонтанной поляризации ($-z$) наблюдалось уменьшение оптического поглощения, а со стороны $+z$, наоборот, увеличение поглощения в виде полосок шириной 0,3–0,4 мм (рис. 3).

Области $-z$ также соответствовало уменьшение показателя преломления, а области $+z$ – его увеличение. Этим данным можно

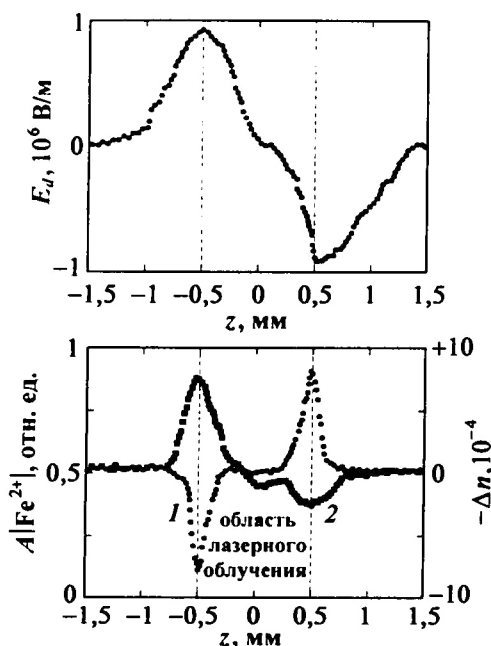


Рис. 3. Распределение напряженности фотоиндуцированного поля E_{ϕ} , оптического поглощения A (1) и изменения показателя преломления Δn (2) вдоль оси z образца относительно центра облучения

сопоставить фотоиндуцированное пространственное перераспределение концентрации ионов Fe^{2+} и Fe^{3+} , поскольку изменения в поглощении наблюдались вблизи длины волны 500 нм, что характерно для оптических переходов ионов Fe^{2+} .

Общей особенностью кривых для скорости и затухания акустических волн (рис. 4) является уменьшение затухания и увеличение соответствующих модулей упругости в левой части области облучения и увеличение затухания и смягчение модулей упругости в правой части. Как следует из полученных данных, рельеф изменения скоростей продольных и поперечных акустических волн вполне соответствует рельефу распределения продольных и сдвиговых деформаций. Это не удивительно, поскольку изменение скоростей так же линейно зависит от напряженности электрического поля.

Далее были исследованы особенности индуцированных лазерным пучком одиночных доменов и периодических доменных структур. Обнаруженные изменения оптических, электрических и упругих параметров на границах структуры, состоящей из доменов шириной 1 мм, представлены на рис. 5.

Рис. 4. Распределение коэффициента поглощения α (1) и относительного изменения скорости продольной акустической волны $\Delta V/V$ (2) вдоль оси z образца относительно центра облученной области

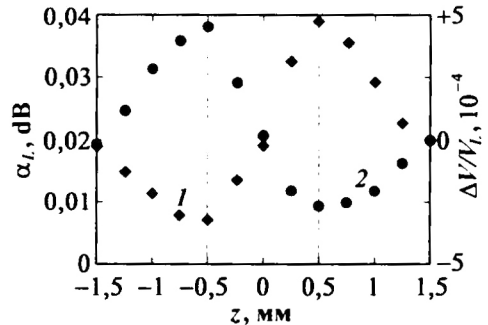
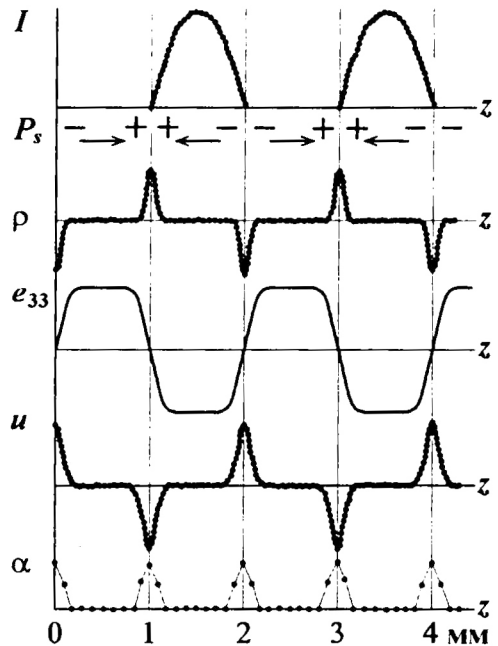


Рис. 5. Распределение областей лазерного облучения I , векторов поляризации P_s , электрических зарядов примесных ионов ρ , пьезоэлектрических коэффициентов e_{33} , упругих деформаций u , коэффициента поглощения ультразвуковых волн α на границах индуцированных доменов с шириной порядка 1 мкм



На основе полученных экспериментальных результатов была разработана микроскопическая модель формирования фотоиндуцированных решеток и доменных структур в кристаллах ниобата лития и других подобных сегнетоэлектрических материалов, содержащих примесные ионы с переменной валентностью, и влияния на эти процессы ян-теллеровских ионов. Модель основана на известном факте сильной связи ян-теллеровских ионов, таких как Fe^{2+} в нашем случае, с ближайшим решеточным

окружением. Их дополнительные смещения относительно первоначальных положений, обусловленные эффектом Яна-Теллера, могут вызывать значительную дополнительную поляризацию кристаллического окружения полем заряженного центра, причем направление этой поляризации будет противоположно направлению спонтанной поляризации.

При пространственном разделении ранее хаотично расположенных по образцу ионов Fe^{2+} и Fe^{3+} в ходе фоторефрактивного эффекта локальные электрические поля вокруг ионов Fe^{2+} (особенно при достаточной концентрации ионов железа) можно рассматривать как совокупность одинаковым образом направленных полей. Значения этих полей, как показали наши расчеты, вполне достаточны для переполаризации объемов вокруг примесных ионов Fe^{2+} при высоких (порядка 150°C) температурах. Образование микродоменов вокруг ионов Fe^{2+} должно, казалось бы, ограничиваться практически первой координационной сферой. Однако в сегнетоэлектриках, и особенно при высокой температуре (150°C), вследствие легкой поляризуемости размеры доменов могут возрастать, и при достаточной концентрации примесных ионов (не менее 10^{25} м^{-3}) может возникать кооперативный эффект образования макроскопических доменов с инверсной поляризацией. Это подтверждается тем фактом, что ширина и пространственное расположение фотоиндуцированных доменов соответствуют расположению максимального изменения показателя преломления, а значит и поля пространственного заряда.

Мы установили, что в образцах с повышением общей концентрации ионов железа и при оптимальной относительной концентрации ионов $\text{Fe}^{2+} \sim 30\%$ происходит уменьшение величины коэрцитивного поля E_c . При этом с уменьшением относительной концентрации ионов Fe^{2+} от оптимального значения коэрцитивное поле снова возрастало. Подобное уменьшение напряженности коэрцитивного поля было позднее обнаружено в кристаллах LiNbO_3 , легированных ионами эрбия [10]. Авторы работы наблюдали уменьшение E_c более чем на 10% в допированных образцах, аналогичных по составу и качеству недопированным образцам.

Итак, проведенные исследования показали, что ян-теллеровские ионы Fe^{2+} понижают величину поля переполаризации в монокристаллах ниобата лития и участвуют в образовании доменов и периодических доменных структур.

Наиболее полное исследование пространственного распределения оптически индуцированных коэффициента поглощения, изменения скоростей акустических волн и градиентов фотоиндуцированных деформаций было

выполнено практически одновременно с нами методом синхротронной дифрактометрии [11]. Однако были исследованы только латеральные упругие деформации, возникающие вдоль осей x , y при направлении вектора спонтанной поляризации p по оси z вокруг некогерентного оптического пучка с достаточно большими размерами ($2 \times 2 \text{ мм}^2$). Тем не менее, были обнаружены достаточно сильные локальные деформации вдоль осей x и y на границах области облучения, что сходится с нашими данными.

В четвертой главе представлены результаты наших исследований по распространению акустических волн через сформированные в ниобате лития решетки и периодические доменные структуры.

Формирование фотоиндуцированных решеток с периодом $d \sim 50 \text{ мкм}$ производилось второй гармоникой ($\lambda = 532 \text{ нм}$) YAG:Nd лазера в течение 60–100 с. Мощность импульсов составляла порядка 1 МВт при длительности 60 нс. В ходе экспериментов было установлено отражение от сформированной решетки импульсов ПАВ, генерируемых и детектируемых широкополосными преобразователями на резонансных частотах в рабочем диапазоне преобразования 60–70 МГц. Коэффициент относительного отражения R для ПАВ составлял порядка 0,3 для 100 периодов структуры (рис. 6).

С учетом общей теории брэгговского отражения от периодической структуры коэффициент отражения для акустической волны можно представить в виде

$$R = \frac{I_r}{I_0} = \sin^2 \left(\pi \frac{\Delta V(E) L_z}{V(0) \lambda} \right), \quad (3)$$

где L_z – длина решетки вдоль оси z ; λ – длина акустической волны; $\Delta V(E)/V(0) = \Delta c^*(E)/2c(0)$ – изменение скорости акустической волны под действием электрического поля; $V(0)$ и $c(0)$ – соответственно скорость акустической волны и модуль упругости в отсутствие индуцированного электрического поля; Δc^* – изменение модуля упругости под действием электрического поля.

При наличии фотоиндуцированной решетки периодическое индуцированное электрическое поле E_d из-за нелинейного пьезоэлектрического эффекта приводит к изменению скорости акустической волны. Для постоянного электрического поля E_d и механически зажатого кристалла эффективный модуль упругости c_{ijkl}^* можно записать в виде:

$$c_{ijkl}^* = c_{ijkl} - e_{mijkl} E_m. \quad (4)$$

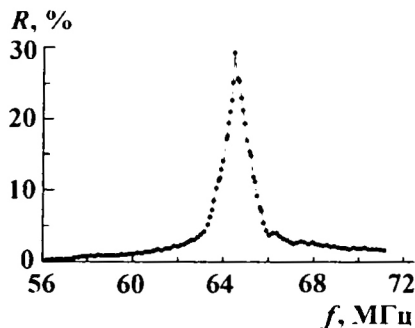


Рис. 6. Частотная зависимость коэффициента отражения ПАВ от фотоиндуцированной решетки

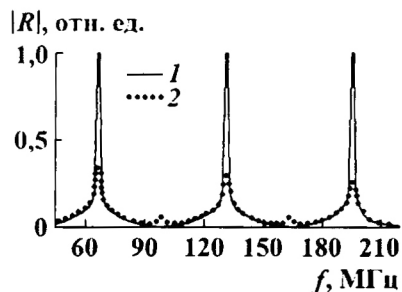


Рис. 7. Спектр отраженных от фотоиндуцированной решетки акустических импульсов: 1 – теоретический спектр; 2 – экспериментальный спектр

Как следует из частотной зависимости коэффициента отражения (рис. 6), резонанс наступает при кратности длины волны периоду решетки, а коэффициент отражения удовлетворяет выражению (3).

Частотный спектр отраженных акустических импульсов, представленный на рис. 7, дает основание утверждать, что фотоиндуцированные решетки в сегнетоэлектриках действительно представляют собой одномерные фоновые кристаллы.

Раздел 4.2 содержит результаты изучения отражения и преломления акустических волн на периодической доменной структуре. Отсутствие данных по частотному спектру акустических волн, распространяющихся через индуцированные доменные структуры в сегнетоэлектриках, побудило нас провести более полное и подробное изучение распространения поверхностных акустических волн через ПДС, сформированную в ниобате лития. Выбор ПАВ был неслучаен и обусловлен тем обстоятельством, что уже в течение почти сорока лет проводятся интенсивные исследования по распространению ПАВ в неоднородных твердых средах, приведшие к созданию целого семейства акустоэлектронных устройств.

В первой серии экспериментов исследовалось распространение ПАВ относительно малой интенсивности через доменные структуры. Представленные на рис. 8 амплитудно-частотные характеристики пропускания ПДС соответствуют распространению ПАВ с центральной частотой 32 МГц для ПДС, сформированной оптоакустическим способом, и 32,5 МГц для электрически сформированной ПДС.

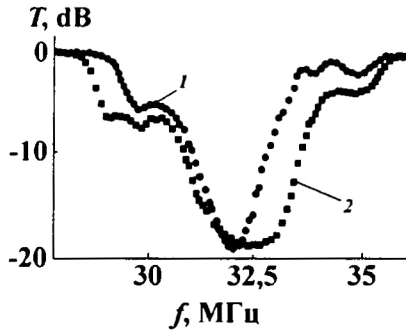


Рис. 8. Амплитудно-частотные характеристики коэффициента пропускания ПДС, созданных опто-акустическим (1) и электрическим (2) способами, для ПАВ

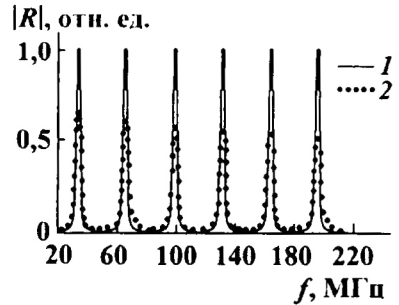


Рис. 9. Спектр отраженных от ПДС импульсов ПАВ: 1 – теоретический спектр; 2 – экспериментальный спектр

Во второй серии экспериментов изучалось распространение ПАВ вдоль периодической структуры доменов, сформированной двумя интерферирующими лазерными пучками. При этом в частотном диапазоне 30–300 МГц был обнаружен ряд максимумов в интенсивности отраженных от ПДС акустических импульсов (рис. 9). Этим максимумам в интенсивности отраженных импульсов соответствовали минимумы в интенсивности прошедших через периодические структуры акустических импульсов. Частоты максимумов отражения соответствовали условию кратности длины акустической волны периоду пространственной структуры. Коэффициенты отражения от ПДС (рис. 9) были практически в два раза больше, чем коэффициенты отражения от фотоиндуцированной решетки (рис. 7), что можно объяснить меньшей глубиной формирования фотоиндуцированной решетки, а также размытием краев элементов решетки.

Теоретическая интерпретация полученных результатов приведена в разделе 4.3. Она основывается на главной особенности ПДС, сформированных в сегнето-пьезоэлектрическом кристалле – периодическом изменении знаков пьезоэлектрических коэффициентов на доменных границах при неизменности упругих и диэлектрических свойств для соседних доменов. Брэгговское отражение от ПДС будет возникать вследствие интерференции между падающей волной и волнами, отраженными от внутренних границ между доменами. В ПДС, состоящей из

N периодов, насчитывается $2N - 1$ границ типа $+/-$ и $-/+$, где знаки “+” и “-” относятся к доменам с противоположной поляризацией.

ПДС можно сравнить с одномерным кристаллом, который инвариантен относительно трансляций на постоянную кристаллической решетки. Поэтому при описании прохождения акустической волны через ПДС можно использовать формальную аналогию с квантовой теорией электронов в кристалле и применять такие понятия, как блоховские волны, разрешенные и запрещенные зоны.

Конструктивная интерференция возникает, когда разность фаз между волнами, отраженными от последовательных границ доменов, составляет целое число длин волн. Таким образом, значения коэффициента отражения акустических волн от ПДС должны иметь периодические максимумы на частотах

$$f_m = Vm/d, \quad (5)$$

где V – скорость акустической волны; d – период ПДС; $m = 1, 2, 3, \dots$, что и наблюдалось в наших экспериментах.

В разделе 4.4 описан предложенный и реализованный способ построения резонаторов и акустических фильтров с широкой полосой перестройки, основанный на использовании фотоиндуцированных решеток и периодических доменных структур в сегнетоэлектрических кристаллах, обладающих большим пьезоэффектом. Фотоиндуцированные структуры, создающиеся посредством облучения поверхности образца двумя интерферирующими лазерными пучками, образуют слои с различными скоростями распространения акустической волны. Совокупность слоев (решетка) обладает резонансными свойствами на частотах, удовлетворяющих выражению (5). При этом период решетки d определяется углом пересечения оптических пучков φ :

$$d = \lambda / (2n \sin \varphi), \quad (6)$$

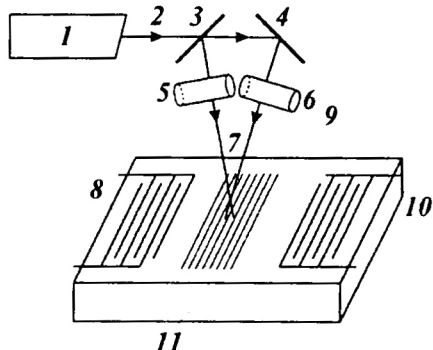
где n – показатель преломления среды.

Поскольку в наши дни значение d можно изменять в пределах от 0,2 до 100 мкм, возникает возможность перекрытия частотного диапазона для акустических волн в пределах от 30 до 2000 МГц.

Функциональная схема акустического фильтра на поверхностных акустических волнах состоит из рабочего элемента, содержащего решетку, лазера с двумя зеркалами, формирующими решетку, входного и выходного пьезопреобразователей (рис. 10). Перестройка резонансной частоты фильтра

осуществляется изменением юстировки формирующих зеркал и тем самым изменением периода решетчатой структуры.

Рис. 10. Перестраиваемый акустический фильтр: 1 – лазер; 2 – первичный лазерный пучок; 3 – полупрозрачное зеркало; 4 – поворотное непрозрачное зеркало; 5, 6 – цилиндрические линзы; 7 – интерферирующие лазерные пучки; 8 – входной встречно-штыревой преобразователь; 9 – сформированная периодическая структура; 10 – выходной встречно-штыревой преобразователь; 11 – пьезоэлектрический звукопровод



Процесс фотоиндуцированного формирования периодической структуры состоит в лазерном облучении поверхности монокристалла, обладающего сильным пьезоэффектом и одновременно фоторефрактивным эффектом. Под действием лазерного пучка с интерференционной структурой в приповерхностном слое на глубину до 0,5 мм образуется периодическая структура, состоящая из слоев, подвергнутых и неподвергнутых лазерному воздействию. Относительное изменение скорости акустической волны в оптически облученных слоях может достигать значений 10^{-4} – 10^{-3} по сравнению с необлученными слоями. Стирание ранее сформированной структуры осуществляется путем ее облучения однородным по площади пучком того же лазера. Перестройка резонансной частоты фильтра осуществляется путем стирания ранее сформированной структуры в приповерхностном слое звукопровода и формирования новой структуры с требуемой резонансной частотой. При этом спектр резонансных частот будет определяться требуемым частотным диапазоном широкополосных входного и выходного преобразователей.

Ранее уже были предложены перестраиваемые оптические резонаторы и фильтры на фотоиндуцированных решетках, но только с электрическим управлением. Предложенный нами метод не пригоден для оптических фильтров, поскольку сами оптические сигналы будут частично или

полностью стирать записанные решетки и поэтому в оптических фильтрах используются устойчивые к оптическому воздействию решетки. Однако, как показали наши эксперименты, фотоиндуцированные решетки устойчивы к воздействию акустических волн в отсутствие каких-либо других разрушающих влияний (нагрев выше 100°C , сильные электрические поля и вибрация).

В ходе экспериментов по изучению резонансных акустических свойств фильтра было установлено затухание импульсов ПАВ, генерируемых и детектируемых широкополосными преобразователями, на резонансных частотах в рабочем диапазоне преобразования 60–70 МГц. Коэффициент затухания для ПАВ на резонансных частотах составлял порядка 10 дБ для 100 периодов структуры (рис. 11).

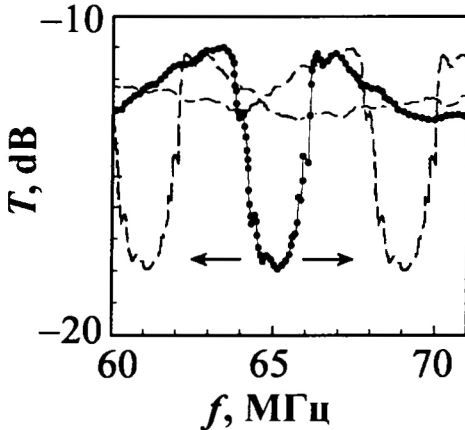


Рис. 11. Частотная зависимость коэффициента прохождения T через акустический резонатор в диапазоне 60–70 МГц при перестройке путем перестроения решетки

Возможность использования малогабаритных лазеров и источников питания с малым энергопотреблением позволяет полагать, что фотоиндуцированные решетки и ПДС, формируемые и стираемые лазерным пучком, могут найти широкое применение в ряде устройств с перестраиваемыми акустическими резонаторами.

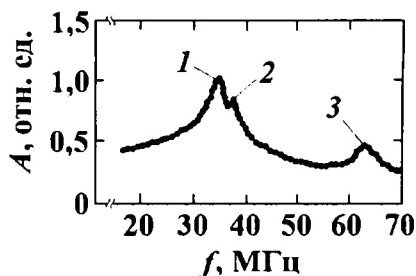
Пятая глава содержит результаты изучения генерации акустических колебаний на периодических доменных структурах в ниобате лития.

В начале главы кратко рассмотрены особенности генерации когерентных акустических колебаний и волн на периодических структурах в сегнетопьезоэлектриках, условия возникновения резонансных колебаний и их усиления. Проведен анализ ранее разработанных способов генерации

акустических колебаний на фотоиндуцированных решетках. Показана неэффективность использования решеток для устойчивой генерации акустических колебаний. Поэтому основное внимание в первой части главы уделено разработанному нами способу импульсной лазерной генерации акустических колебаний на периодической доменной структуре с использованием эффекта фотогенерации большого количества свободных носителей. Он представляет собой новый способ, отличный от генерации колебаний на доменной структуре с использованием переменного электрического поля. Лазерную генерацию можно представить в виде двухэтапного процесса: на первом из них происходит фотовозбуждение большого количества свободных носителей, электрическое поле которых уменьшает величину поля поляризации в каждом из доменов. На втором этапе скачки электрического поля вследствие обратных знаков пьезоэлектрических коэффициентов в соседних доменах создают переменные деформации.

При воздействии на область ПДС каждым лазерным импульсом на обоих акустических преобразователях детектировались радиопульсы, соотнесенные по времени прохождения на детекторы как сигналы поверхностной акустической волны, продольной и поперечной компонент приповерхностной акустической волны. Максимумы частотного спектра этих типов волн, представленного на рис. 12, соответствуют условию равенства длины акустической волны периоду доменной структуры. Амплитуда относительных деформаций в акустической волне достигала значений порядка 10^{-4} .

Рис. 12. Спектры лазерной генерации акустических волн на ПДС в ниобате лития: 1 – поверхностная акустическая волна; 2 – поперечная компонента приповерхностной акустической волны; 3 – вторая гармоника ПАВ



Во второй части главы описана физическая модель генерации акустических колебаний, основанная на эффекте модуляции полей поляризации в доменах электрическими полями, индуцированными лазерными импульсами. Выполненный расчет показал, что эффективность

преобразования энергии лазерных импульсов в акустическую волну пропорциональна числу доменных границ и добротности акустического резонатора. При значении напряженности фотоиндуцированного поля порядка 10^7 В/м, что наблюдалось для образцов ниобата лития с железом, коэффициент преобразования может значительно превосходить последний при генерации акустических колебаний на ПДС переменным электрическим полем. Более того, при лазерном способе генерации исключаются потери на согласование ПДС с источником возбуждающего переменного электрического поля.

Шестая глава посвящена изучению нелинейных эффектов, возникающих при распространении акустических волн через периодические структуры в ниобате лития. Основное внимание уделено генерации второй гармоники в спектре акустических волн, нелинейному параметрическому взаимодействию акустических волн на ПДС и обращению волнового фронта (ОВФ).

Возникновение второй гармоники поверхностной акустической волны было обнаружено нами при исследовании прохождения интенсивных ($10^{-5} < u < 10^{-4}$) поверхностных акустических волн через периодическую доменную структуру, сформированную в ниобате лития. При фиксированной частоте генератора в интервале 32–35 МГц и перестройке частоты супергетеродинного приемника были обнаружены, помимо сигналов на основной частоте, также сигналы акустических импульсов в интервале 60–65 МГц, т.е. на частоте, соответствующей второй гармонике генерируемых акустических импульсов. При этом в зависимости интенсивности на основной частоте $I(\omega)$ от величины переменного напряжения на преобразователе $u(\omega)$ (рис. 13) наблюдалось нелинейное уменьшение $I(\omega)$ с ростом $u(\omega)$, что связано с нелинейным увеличением интенсивности сигнала второй гармоники $I(2\omega)$.

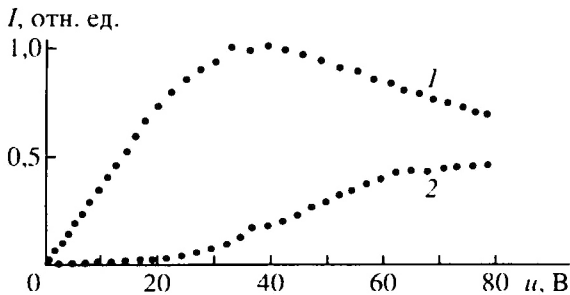


Рис. 13. Зависимость интенсивности первой (1) и второй (2) гармоник ПАВ от приложенного к преобразователю напряжения

Точно такое же поведение интенсивности наблюдалось и при генерации второй гармоники на частотах, удовлетворяющих более высоким резонансам: $f = 63$ МГц, $2f = 126$ МГц и далее на всех высших гармониках.

Нелинейное взаимодействие акустической волны с частотой ω с периодической структурой, приводящее к генерации второй гармоники (2ω) в прямом направлении, возможно при условии фазового синхронизма

$$k_{2\omega} + 2k_{\omega} - k_z = 0, \quad (7)$$

где k_{ω} и $k_{2\omega}$ – волновые вектора первой и второй гармоник соответственно; k_z – волновой вектор ПДС.

В этом случае механизм генерации второй гармоники основан на процессе отражения акустической волны на границах каждого домена, который приводит к трехволновому взаимодействию: прямой волны, отраженной волны и нелинейной периодической структуры.

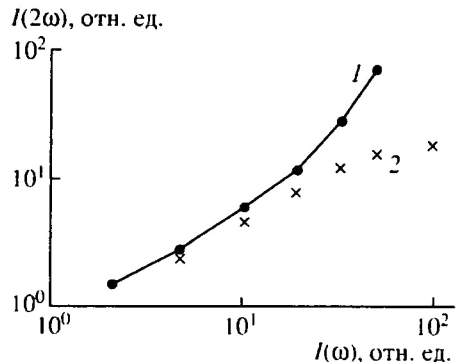
Выполненный теоретический расчет для трехволнового взаимодействия показал, что интенсивность второй гармоники

$$I(2\omega) = \Gamma^2 I(\omega)^2 L^2 \sin^2\left(\frac{1}{2} k_z L\right) / \left[d^2 \left(\frac{1}{2} k_z L\right)^2 \right] \quad (8)$$

имеет нелинейную (квадратичную) зависимость относительно $I(\omega)$, что и наблюдается на рис. 14. Здесь Γ – коэффициент взаимодействия двух волн с частотой ω ; L – длина ПДС; d – период ПДС.

Некоторое падение интенсивности $I(\omega)$ с ростом ω (рис. 13) можно объяснить нелинейным увеличением интенсивности второй гармоники и, следовательно, возрастанием перекачки энергии от первой во вторую гармонику.

Рис. 14. Зависимость интенсивности второй гармоники ПАВ от интенсивности первой гармоники: 1 – расчетные данные; 2 – эксперимент



В последующих разделах главы представлены результаты изучения параметрического взаимодействия двух встречных акустических волн и предложенный новый способ обращения волнового фронта акустических импульсов.

При падении импульсов ПАВ на частоте 60–70 МГц были обнаружены одновременно два отраженных от ПДС импульса, первый из которых соответствовал основной частоте, а другой – второй гармонике. Амплитуда отраженного импульса на частоте 2ω была почти на порядок меньше амплитуды отраженного импульса основной частоты. В целом коэффициент отражения для второй гармоники составлял 10^{-2} , что почти на два порядка выше, чем для аналогичного преобразования с помощью однородной акустической нелинейности в таком же кристалле ниобата лития.

Представленная на рис. 15 зависимость амплитуды второй гармоники от относительной деформации на частоте ω может быть объяснена нелинейным характером процесса преобразования, при котором квадратичная зависимость интенсивности второй гармоники по отношению к интенсивности волны на основной частоте вполне соответствует полученным экспериментальным результатам.

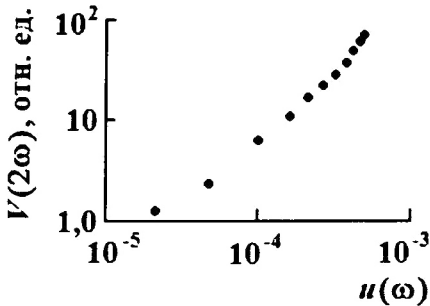


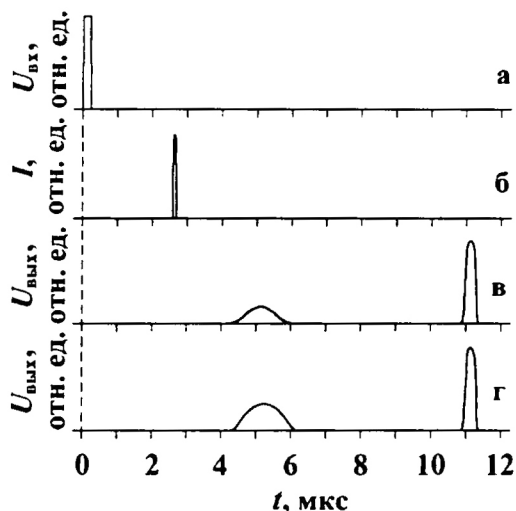
Рис. 15. Зависимость амплитуды электрического сигнала второй гармоники от амплитуды относительной деформации на частоте ω

Полученные ранее экспериментальные результаты стали основой для разработки нового способа ОВФ, основанного на лазерной генерации акустических волн на фоторефрактивных решетках и периодических доменных структурах. Предложенная модель ОВФ основана на установленном факте, что при импульсном лазерном воздействии на ПДС во всех доменах будет происходить процесс частичной или полной взаимной компенсации фотоиндуцированного поля и поля спонтанной поляризации. При этом процессе на границах доменов будут возникать сильные градиенты

переменного электрического поля с частотой ω , соответствующей периоду доменной структуры.

Таким образом, при импульсном лазерном облучении будет периодически возникать сильное импульсное электрическое поле, которое на ПДС будет преобразовываться нелинейным образом в серию переменных импульсных полей с частотами ω , 2ω , 3ω и т.д. Теоретически способ лазерного возбуждения акустических волн в полупроводниковых структурах и ОВФ был рассмотрен в работе [12]. В обоих случаях процесс далее подобен трехволновому нелинейному взаимодействию двух акустических импульсов с частотами ω и противоположно направленными волновыми векторами и импульсом электромагнитного поля с частотой 2ω , что и было продемонстрировано на кристаллах ниобата лития с ПДС, использовавшихся в предыдущих экспериментах.

Рис. 16. Временные диаграммы входного сигнала с генератора ПАВ (а), оптического импульса (б) и детектируемого сигнала в отсутствие (в) и при наличии импульсного оптического облучения области периодической доменной структуры (г)



Оптические импульсы второй гармоники YAG:Nd^{3+} лазера ($\lambda = 0,53$ мкм) с длительностью $6 \cdot 10^{-8}$ с, частотой следования 1 кГц и плотностью мощности до 10^8 Вт/м² создавали облучение сформированной на поверхности ниобата лития ПДС синхронно со временем распространения импульсов ПАВ через ПДС. Вначале детектировался импульс ПАВ, отраженный от ПДС, а далее следовал импульс, отраженный от торца образца (рис. 16). В зависимости от интенсивности лазерных импульсов при

условии синхронизации времени подачи лазерного импульса со временем прихода акустического импульса на ПДС наблюдалось усиление амплитуды отраженных от ПДС импульсов ПАВ на первой и второй гармониках.

Следует подчеркнуть, что изменение амплитуды акустических импульсов на частотах ω и 2ω при лазерном облучении касалось только импульсов, отраженных от сформированной ПДС. При этом усиление амплитуды пропадало при отсутствии синхронизации между временем генерации оптических и акустических импульсов, а также облучении поверхности образца вне ПДС.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. В результате проведенных комплексных исследований серии сегнетоэлектрических пьезополупроводниковых кристаллов ниобата лития, содержащих примесные ионы железа с различной концентрацией и соотношением концентраций ионов $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$, установлен механизм переноса фотоиндуцированных зарядов и образования индуцированных электрических полей.

2. Установлено понижение значения коэрцитивного поля в ниобате лития, содержащем примесные ян-теллеровские ионы, по сравнению с нелегированными образцами конгруэнтного состава, что объясняется возникновением вокруг ян-теллеровских ионов градиентов электрических полей, обратных полю спонтанной поляризации.

3. Исследовано пространственное изменение оптических и упругих характеристик образцов ниобата лития в области воздействия лазерного облучения и разработана модель влияния примесных ионов на формирование индуцированных решеток и доменов.

4. Исследованы процессы влияния стоячих акустических волн на движение фотоиндуцированных электронов и установлено возникновение сильных градиентов фотоиндуцированных полей в пучностях волны, создающее возможность формирования решеток и доменов.

5. Исследованы процессы и механизмы силового влияния лазерного излучения на внутридоменные поля поляризации и обнаружена лазерная генерация акустических волн с длиной волны, кратной периоду доменной структуры.

6. При изучении распространения акустических волн через сформированные в ниобате лития решетки и периодические доменные структуры обнаружен полосовой характер спектра и показано, что такие структуры в сегнетоэлектриках относятся к классу фоновых кристаллов.

7. В результате экспериментальных исследований установлено, что индуцированные решетки и доменные структуры обладают отражающими и преломляющими свойствами в условиях совпадения или кратности периода структуры и длины акустической волны.

8. Исследованы процессы и установлены механизмы параметрического трехволнового взаимодействия, приводящего к генерации акустических волн в обратном направлении по отношению к падающей на структуру волне.

9. Обнаружено обращение волнового фронта акустической волны, основанное на периодической лазерной модуляции внутримоночных полей поляризации.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Ведущие рецензируемые научные журналы и издания, входящие в перечень ВАК

1. *Калимуллин Р.И.* Инверсные домены в ниобате лития / Голенищев-Кутузов А.В., Калимуллин Р.И. // Спб. : Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23. № 22. С. 34-38.

2. *Калимуллин Р.И.* Возникновение доменной структуры в ниобате лития под действием лазерного излучения / Батанова Н.Л., Голенищев-Кутузов А.В., Калимуллин Р.И. // М. : Изв. РАН. Сер. физ. 1998. Т. 62. № 2. С. 384-386.

3. *Калимуллин Р.И.* Фотоиндуцированные домены в ниобате лития / Голенищев-Кутузов А.В., Калимуллин Р.И. // Спб. : ФТТ. 1998. Т. 40. № 3. С. 531-533.

4. *Калимуллин Р.И.* Лазерная генерация акустических волн на периодической доменной структуре в ниобате лития / Голенищев-Кутузов А.В., Голенищев-Кутузов В.А., Калимуллин Р.И. // М. : Акуст. ж. 2000. Т. 46. № 3. С. 581-585.

5. *Калимуллин Р.И.* Индуцированные домены и периодические доменные структуры в электро- и магнитоупорядоченных веществах / Голенищев-Кутузов А.В., Голенищев-Кутузов В.А., Калимуллин Р.И. // М. : УФН. 2000. Т. 170. № 7, С. 697-712.

6. *Kalimullin R.* Nonlinear interaction of SAW with periodic domain structures in LiNbO₃ crystals / Batanova N., Golenishchev-Kutuzov A., Golenishchev-Kutuzov V., Kalimullin R. // Philadelphia : Ferroelectrics. 2003. V. 285. P. 321-325.

7. *Калимуллин Р.И.* Отражение и преломление ПАВ на периодической доменной структуре / Батанова Н.Л., Голенищев-Кутузов А.В., Голенищев-Кутузов В.А., Калимуллин Р.И. // М. : Акуст. ж. 2004. Т. 50. № 5. С. 581-585.

8. *Калимуллин Р.И.* Распространение акустических волн через периодические системы доменов и фотоиндуцированные решетки в сегнетоэлектриках / Батанова Н.Л., Голенищев-Кутузов А.В., Голенищев-Кутузов В.А., Калимуллин Р.И. // М. : Известия РАН. Сер. физ. 2004. Т. 68. № 12. С. 1694-1696.

9. *Калимуллин Р.И.* Роль ян-теллеровских ионов в оптическом формировании доменов в ниобате лития / Батанова Н.Л., Голенищев-Кутузов А.В., Голенищев-Кутузов В.А., Калимуллин Р.И. // СПб. : ФТТ. 2006. N. 48. № 11. С. 2017-2021.

10. *Калимуллин Р.И.* Распространение высокочастотных акустических волн через структуру ян-теллеровских ионов в ниобате лития с железом / Голенищев-Кутузов А.В., Голенищев-Кутузов В.А., Калимуллин Р.И. // СПб. : ФТТ. 2008. Т. 50. № 6. С. 1068-1070.

11. *Калимуллин Р.И.* Влияние ян-теллеровских деформаций на структурно- и магнито-упорядоченные состояния в перовскитоподобных оксидах переходных металлов / Богданова Х.Г., Булатов А.Р., Голенищев-Кутузов В.А., Калимуллин Р.И. и др. // М. : Известия РАН. Сер. физ. 2008. Т. 72. № 8. С. 1225-1227.

12. *Калимуллин Р.И.* Перестраиваемый акустический резонатор на фотоиндуцированной решетке в ниобате лития / Батанова Н.Л., Голенищев-Кутузов А.В., Голенищев-Кутузов В.А., Калимуллин Р.И. и др. // СПб. : Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. В. 4. С. 1-5.

Монография

13. *Калимуллин Р.И.* Индуцированные доменные структуры в электро- и магнитоупорядоченных веществах / Голенищев-Кутузов А.В., Голенищев-Кутузов В.А., Калимуллин Р.И. М. : Физматлит, 2003. 136 с.

Патент на изобретение

14. *Калимуллин Р.И.* Фильтр на поверхностных акустических волнах: пат. 2351063 Рос. Федерация: МПК H03H 9/64 / Голенищев-Кутузов А.В., Голенищев-Кутузов В.А., Калимуллин Р.И.; заявл. 01.11.2007. Оубл. : 27.03.2009 Бюл. № 9.

Работы, опубликованные в материалах международных конференций и симпозиумов

15. *Kalimullin R.* Interaction of laser radiation with system optically induced domains / Golenishchev-Kutuzov A., Efimov E., Kalimullin R., Golenishchev-Kutuzov V. // Proc. SPIE. 1997. V. 3239. P. 246-248.

16. *Калимуллин Р.И.* Обращение волнового фронта ультразвуковых пучков на периодических доменных структурах в пьезоэлектриках / Батанова Н.Л., Голенищев-Кутузов А.В., Голенищев-Кутузов В.А., Калимуллин Р.И. // VII межд. научно-техн. конф. «Радиолокация, навигация, связь» : Материалы докладов. Воронеж, 2001. Т. 2. С. 1272-1275.

17. *Калимуллин Р.И.* Преобразование и обработка оптических, акустических и радиочастотных сигналов на фотонных, фононных и магннных кристаллах / Батанова Н.Л., Голенищев-Кутузов А.В., Голенищев-Кутузов В.А., Калимуллин Р.И. // Труды Девятой международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы твердотельной электроники и микроэлектроники». Таганрог : Таганрогский гос. радиотехн. ун-т, 2004. Часть 2. С. 120-121.

18. *Калимуллин Р.И.* Акустооптический фильтр на фоторефрактивной решетке в ниобате лития / Батанова Н.Л., Богданова Х.Г., Булатов А.Р., Калимуллин Р.И. и др. // Международная научная конференция «Актуальные проблемы физики твердого тела» (ФТТ-2005): Сборник докладов. Минск : Издательский центр БГУ, 2005. Т. 2. С. 499-500.

19. *Калимуллин Р.И.* Влияние ян-теллеровских деформаций на структурно- и магнито-упорядоченные состояния в перовскитоподобных оксидах переходных металлов / Богданова Х.Г., Булатов А.Р., Голенищев-Кутузов В.А., Калимуллин Р.И. и др. // Первый международный, междисциплинарный симпозиум «Среды со структурным и магнитным упорядочением» (Multiferroics-2007) : Труды симпозиума. Ростов-на-Дону : Южный федеральный университет, 2007. С. 83-84.

20. *Калимуллин Р.И.* Акустоэлектронные устройства на фотониндуцированных решетках и периодических доменных структурах / Батанова Н.Л., Голенищев-Кутузов А.В., Голенищев-Кутузов В.А., Калимуллин Р.И. // XV Международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация и связь. RLNC-2009» : Сборник докладов. Воронеж : НПФ «САКВОЕЕ» ООО, 2009. Т. 3. С. 1784-1790.

СПИСОК ЦИТИРУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Prokhorov A., Kuzminov Yu. Ferroelectric crystals for laser radiation control. London: Hilger, 1990.
2. Гуляев Ю.В. Акустоэлектроника – российский приоритет. Радиотехника и управление. 2002. № 2–3.
3. Shur V.Ya. Advanced Dielectric, Piesoelectric and Ferroelectric Materials – Synthesis, Characterization and Applications. Woodhead Publishing Ltd, 2007.
4. Леманов В.В. Сегнетополупроводники. Физическая энциклопедия. М.: Большая Российская энциклопедия, 1994. Т. 4. С. 475.
5. Рытов С.М. Электромагнитные свойства мелкостолстой среды. ЖЭТФ. 1955. Т. 29. № 5. С. 605–612.
6. Петров М.П., Степанов С.И., Хоменко А.В. Фоторефрактивные кристаллы в когерентной оптике. СПб.: Наука, 1992.
7. Владимирцев Ю.В., Голенишев-Кутузов А.В. Индуцированное светом изменение скорости ультразвуковых волн в ниобате лития. ФТТ. 1980. Т. 22. № 1. С. 217–218.
8. Valdivia C.E., Sones C.L., Mails S. et. al. Ultrashort-pulse optically-assisted domain engineering in lithium niobate. Ferroelectrics. 2006. V. 340. P. 75–82.
9. Ostrovskii I.V., Nadochiy A.B. Multidomain ultrasonic transducers. J. Appl. Phys. 2008. V. 103. P. 104107.
10. Paturzo M., Grilli S., Ferraro P. et al. Optical characterisation of erbium doped LiNbO₃ poling properties. J. Appl. Phys. 2008. V. 104. P. 014103.
11. Calamiotou M., Chrysanthakopoulos N., Papaioannou G. Dynamics of photodeformations and space charge field in photorefractive Fe:LiNbO₃ studied with synchrotron area diffractometry. J. Appl. Phys. 2007. V. 102. P. 083527.
12. Брысев А.П., Михалевиц В.Г., Стрельцов В.Н. Параметрическое обращение нелинейных акустических волн. Письма в ЖЭТФ. 2002. Т. 75. В. 11. С. 660–663.

| | | |
|-----------------------------|-------------------|-------------------|
| Подписано к печати 29.06.09 | | Формат 60×84/16 |
| Гарнитура "Times" | Вид печати РОМ | Бумага "Business" |
| Физ. печ. л. 2,0 | Усл.-печ. л. 1,88 | Уч.-изд. л. 2,0 |
| Тираж 100 экз. | Заказ № | |

РПФ «Инфоцентр»
420126, Казань, Меридианная, 10